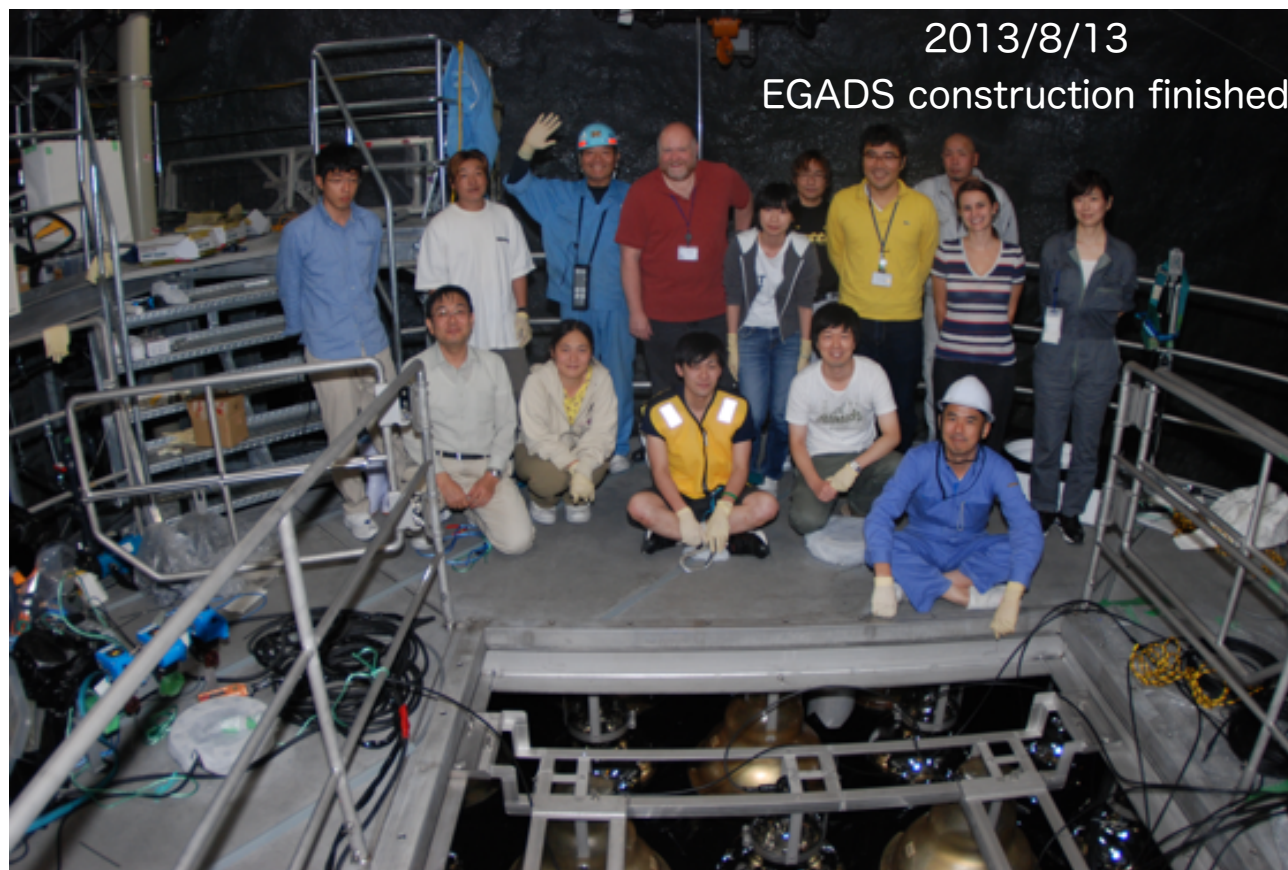




# SK-Gd計画

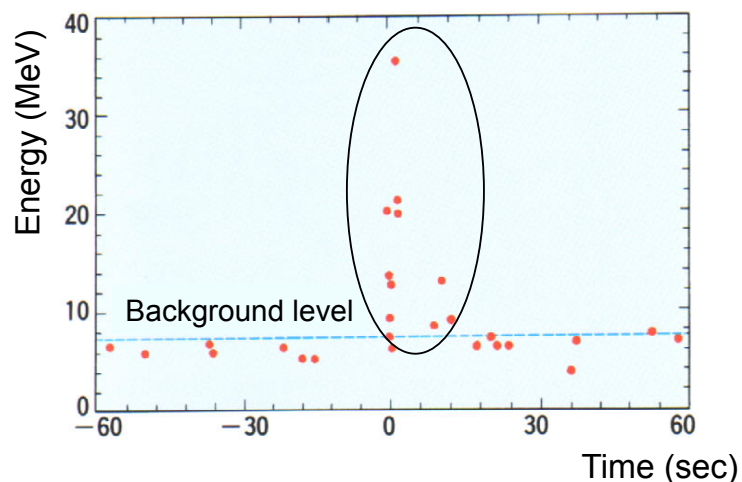


小汐由介（岡山大学）

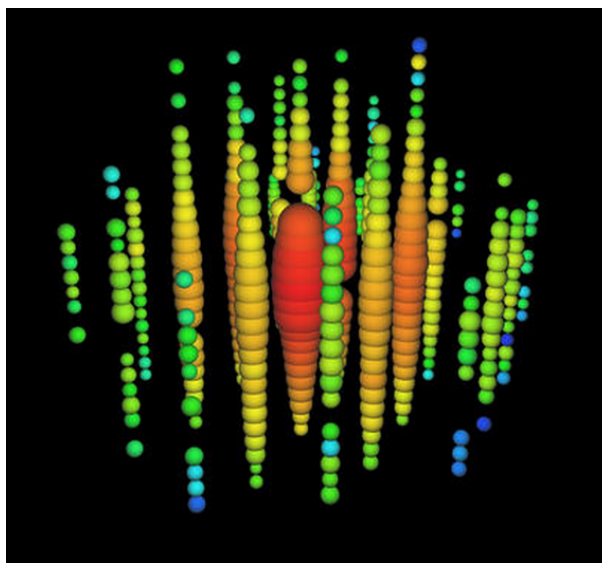
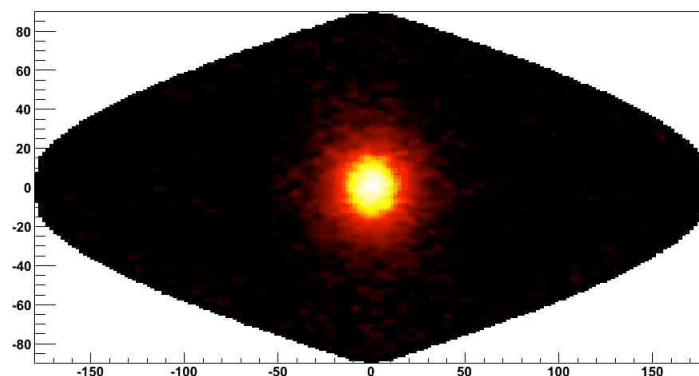
新学術領域・宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究  
領域研究会・岡山大学・2017年5月23日

# これまでに観測された宇宙ニュートリノ

## SN1987A



## Solar Neutrino



## IceCube

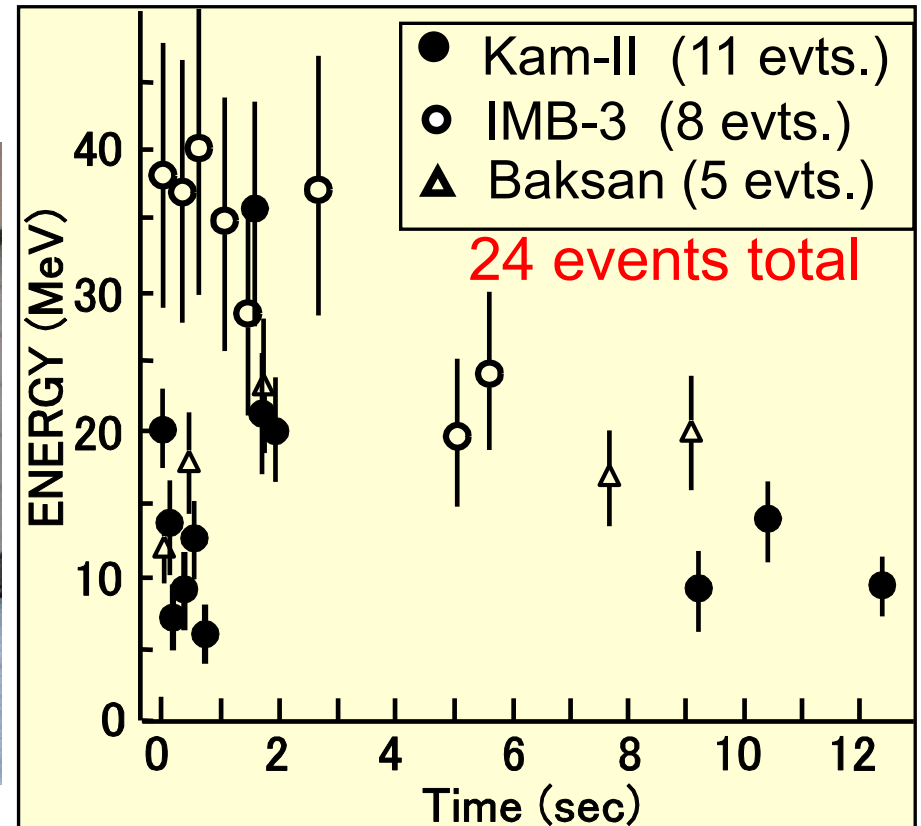
次は 超新星背景ニュートリノ！  
銀河系内超新星爆発ニュートリノ！

# 30 years anniversary of SN1987A

Workshop at Koshiba hall in U.of.Tokyo  
on Feb. 12-13, 2017



<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=2935>



肉眼で見えるほど明るい超新星爆発は約400年ぶり  
その後も30年間起こっていない

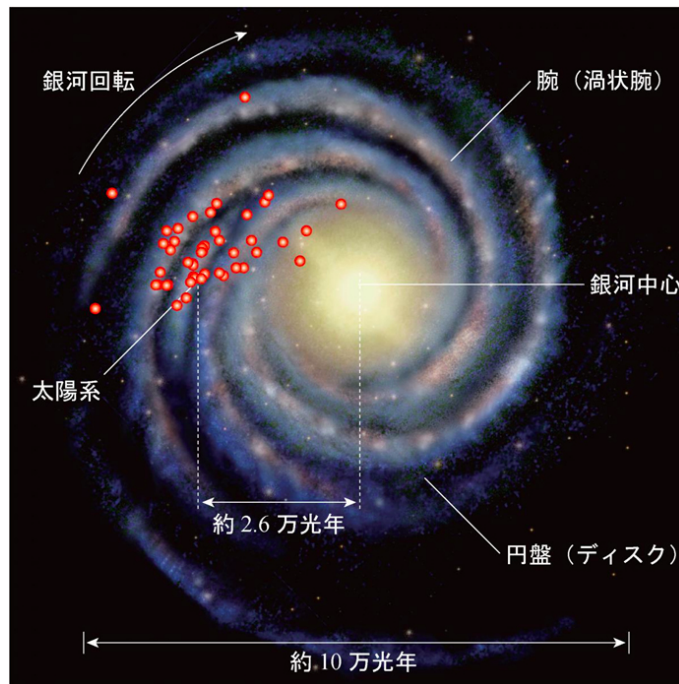


# No chance for Supernova neutrino search for next hundred's years?

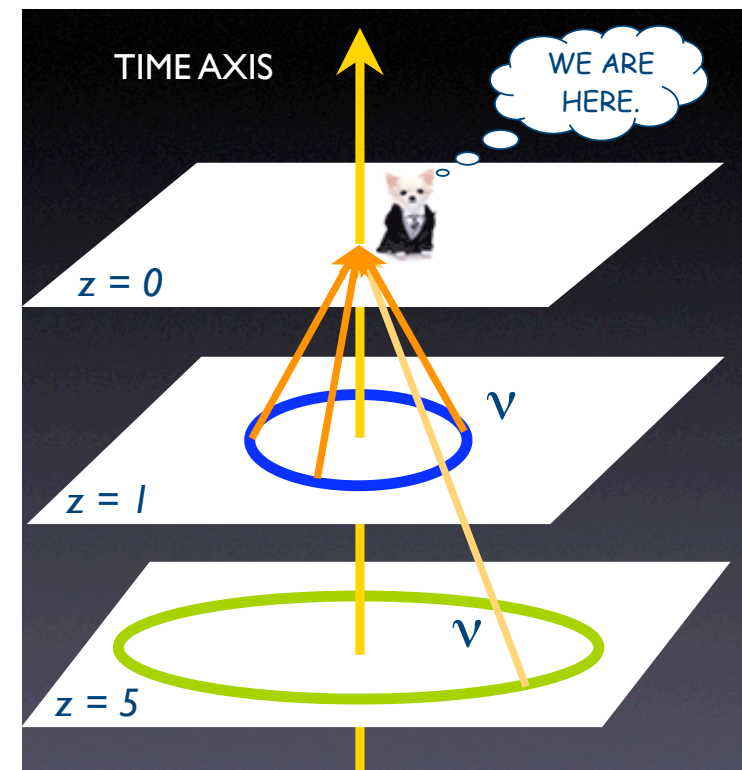


## We believe, yes!

銀河系内超新星爆発  
(a few per century)

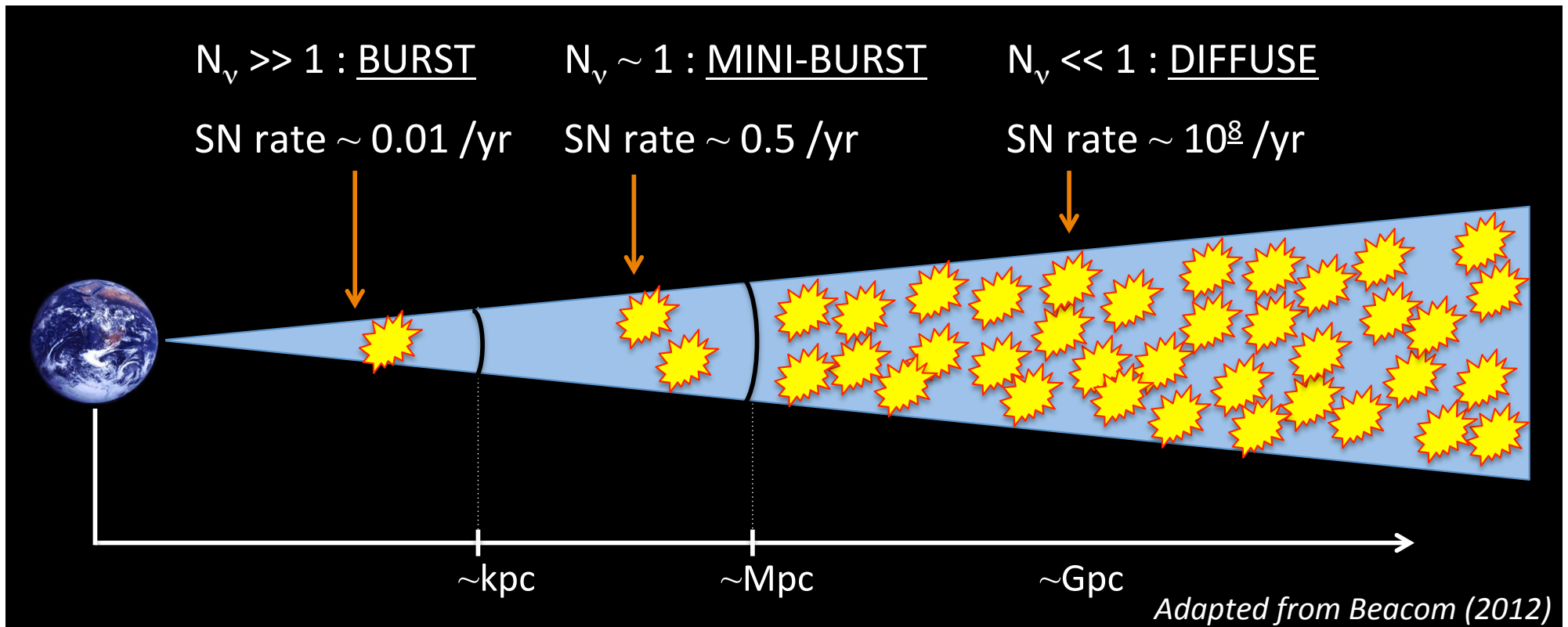


超新星背景ニュートリノ





# Several targets of Supernova Neutrinos



# 超新星背景ニュートリノ研究の歴史

- 最初に指摘されたのは1960年代
- 1980年代になって計算がなされた
- Kamiokande で初めて観測による上限値がつけられた (1988年)
- SKでの観測上限値 (2003年, 2012年)
- Ando and Sato (2004年) の理論予測
- 現在では詳細な理論計算がされている。

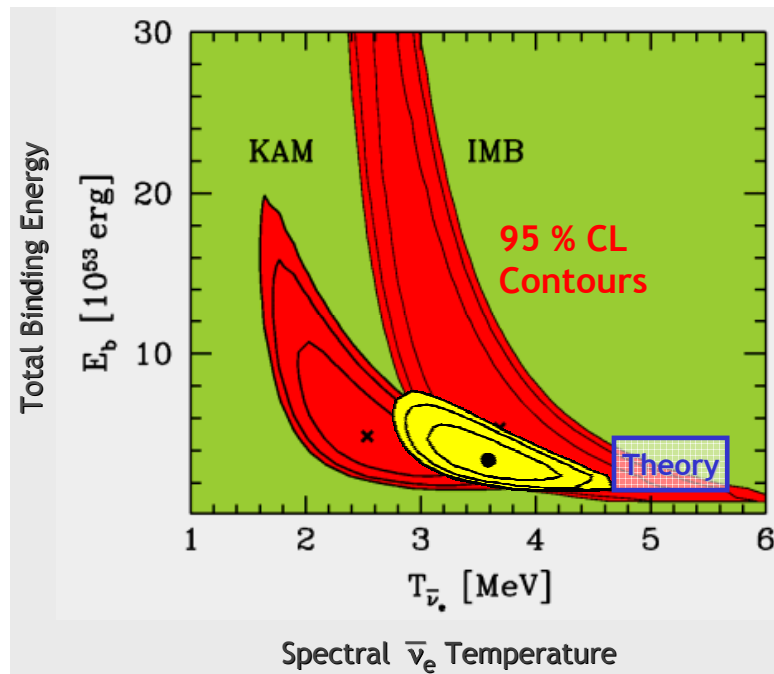
# Physics Motivation

## 大質量星形成の歴史探索

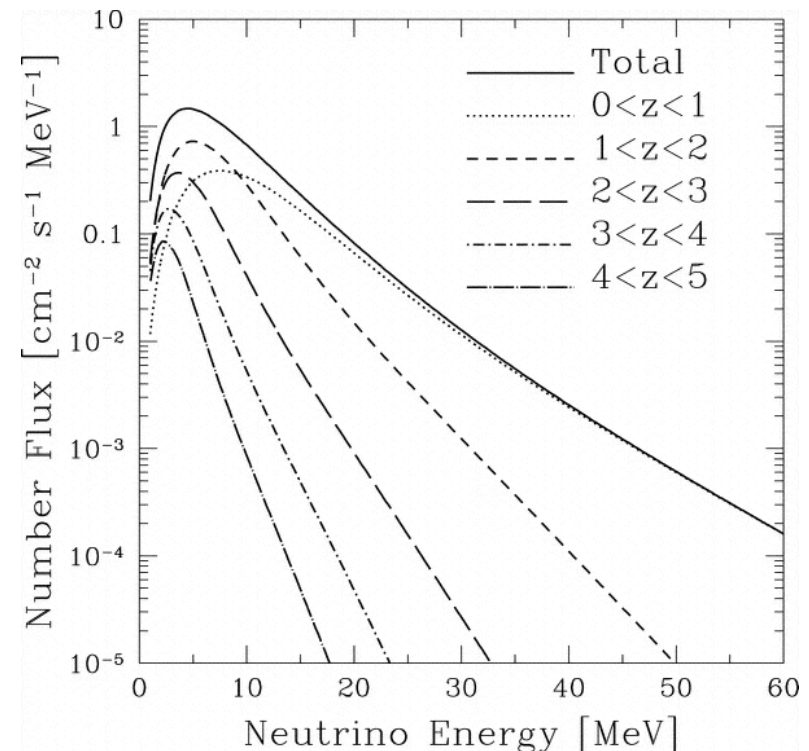
$$\frac{d\phi}{dE_\nu}(E_\nu) = \int_0^\infty \frac{[(1+z)\varphi[E_\nu(1+z)]] [R_{SN}(z)]}{\left[ \left| \frac{c dt}{dz} \right| dz \right]}$$

超新星爆発で放射されるニュートリノスペクトル

超新星爆発の頻度



Jegerlehner, Neubig, Raffelt, PRD 54 (1996) 1194



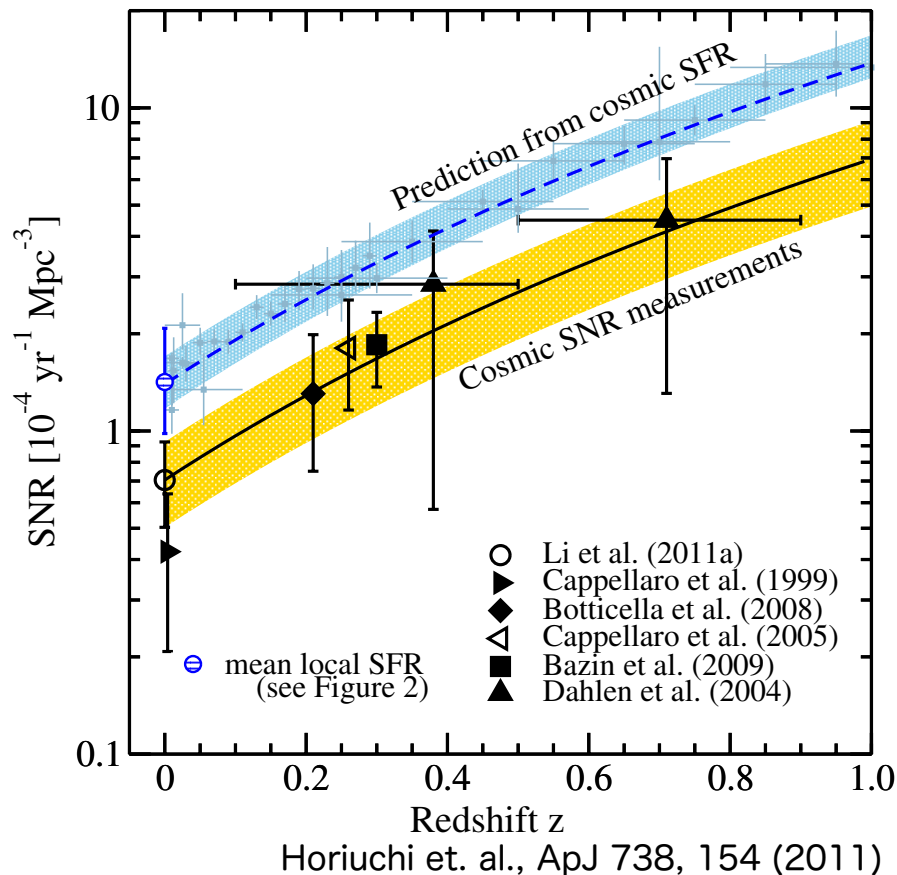
S.Ando, ApJ. 607; 20-31, 2004



# Physics Motivation

## 超新星爆発の頻度

観測された超新星残骸から見積もった超新星の頻度は、SFRから予測される頻度に比べて半分くらいしかない。



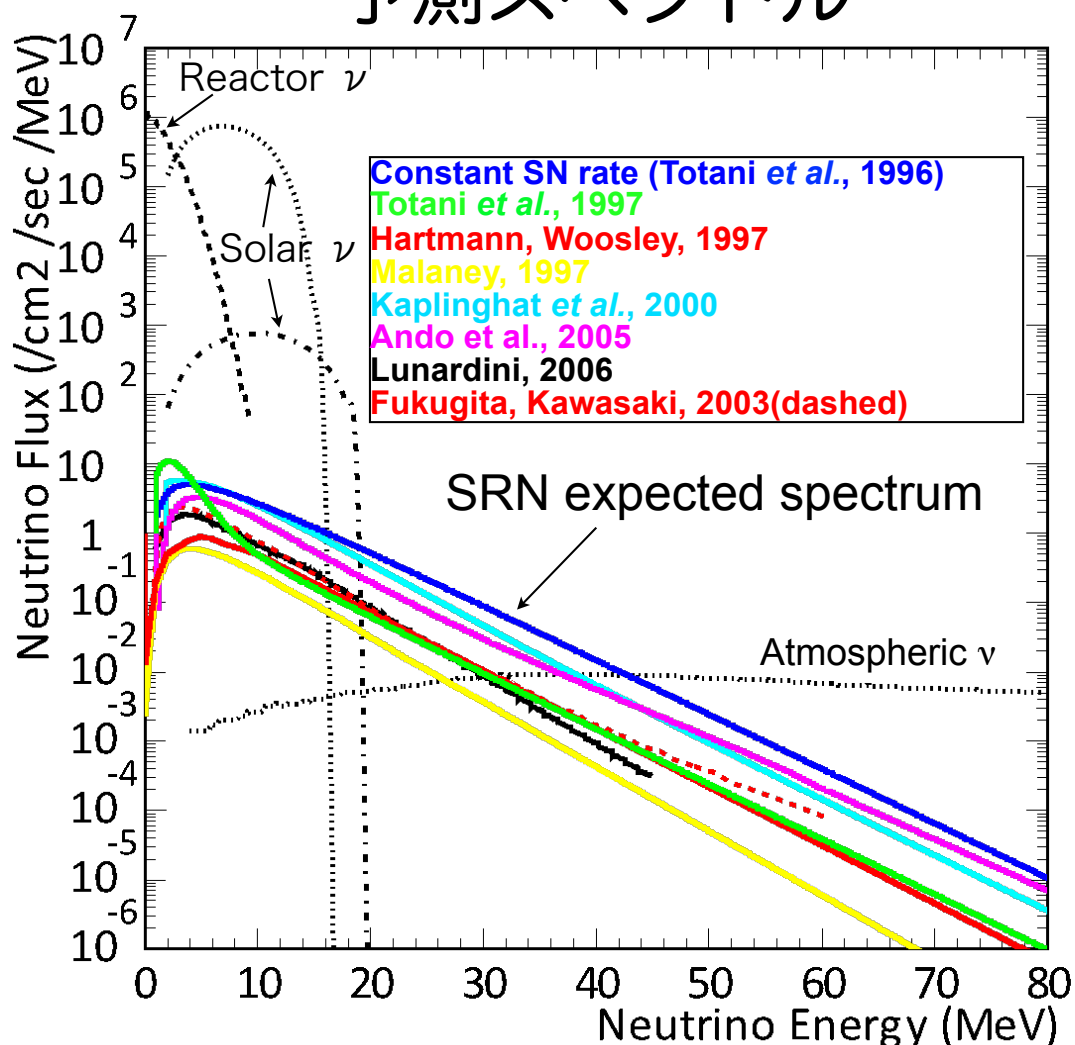
- ・明るさが暗い超新星があるのか？
- ・光を遮るものがあるって見えないのか？

超新星背景ニュートリノの  
観測が重要

Why SK-Gd

# 超新星背景ニュートリノ探索

## 予測スペクトル



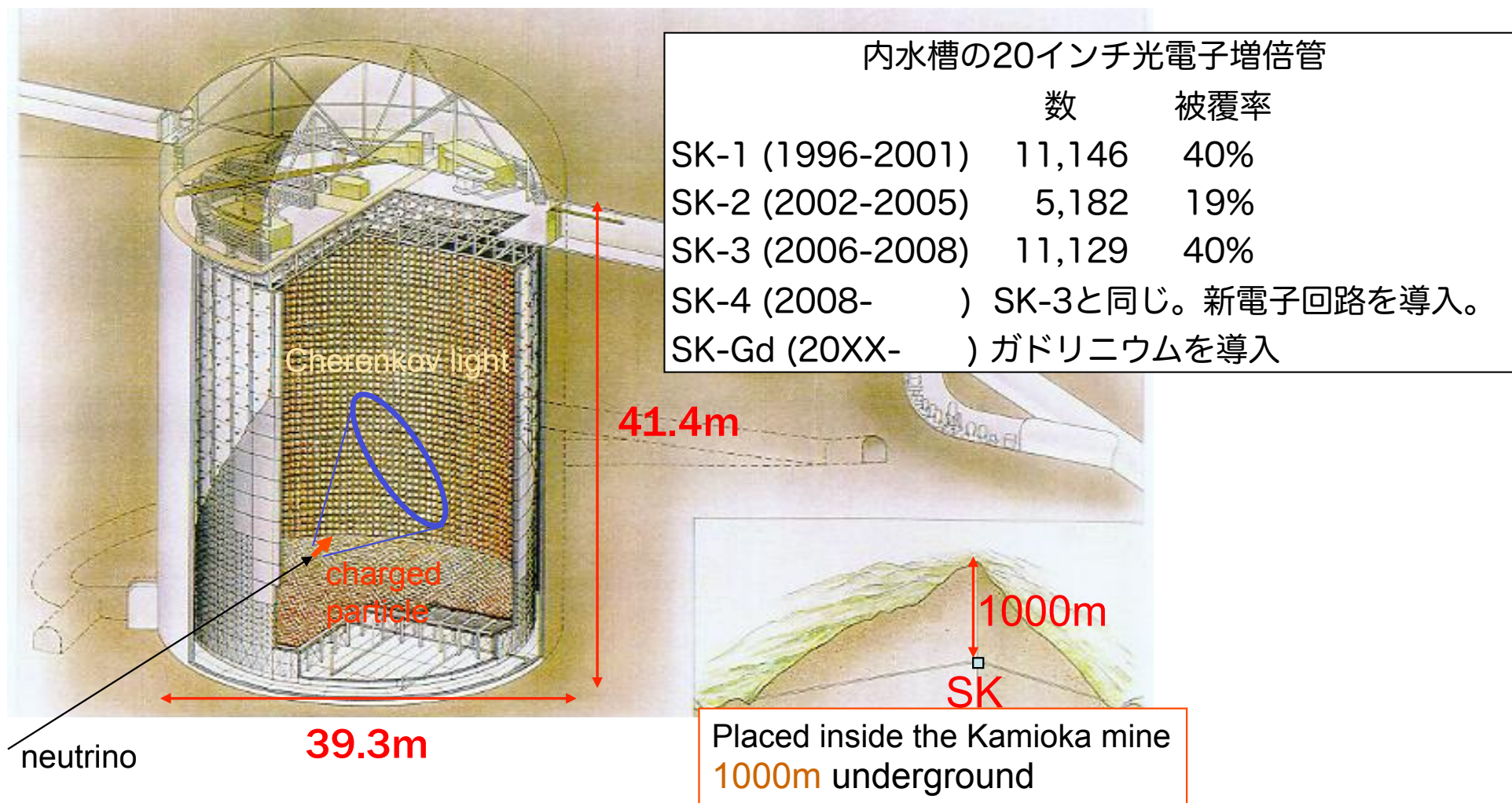
- ・約10秒間バースト的に発生する超新星爆発ニュートリノと異なり、常に漂っているフラックスの小さい信号の探索になる。したがってバックグラウンド事象との識別が鍵となる。
- ・等方的に発生することから、水チェレンコフ検出器での太陽ニュートリノ弾性散乱事象との区別には、方向情報が使える。
- ・バックグラウンド事象の識別には同時遅延計測手法が強力な武器



# 超新星背景ニュートリノ探索

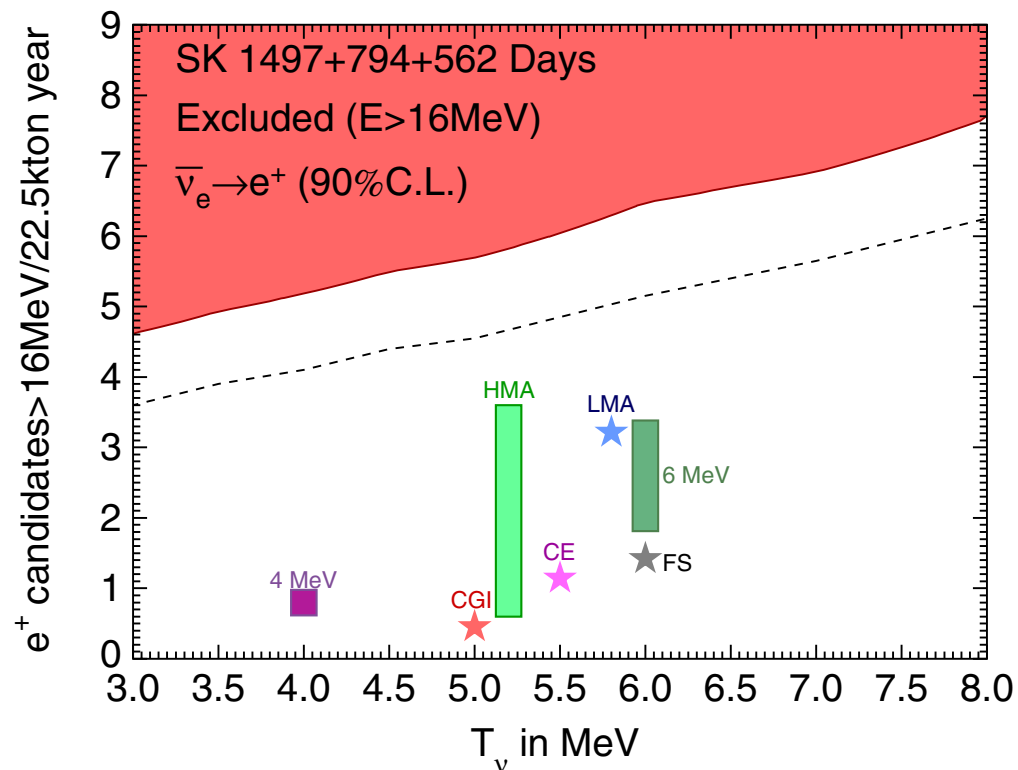
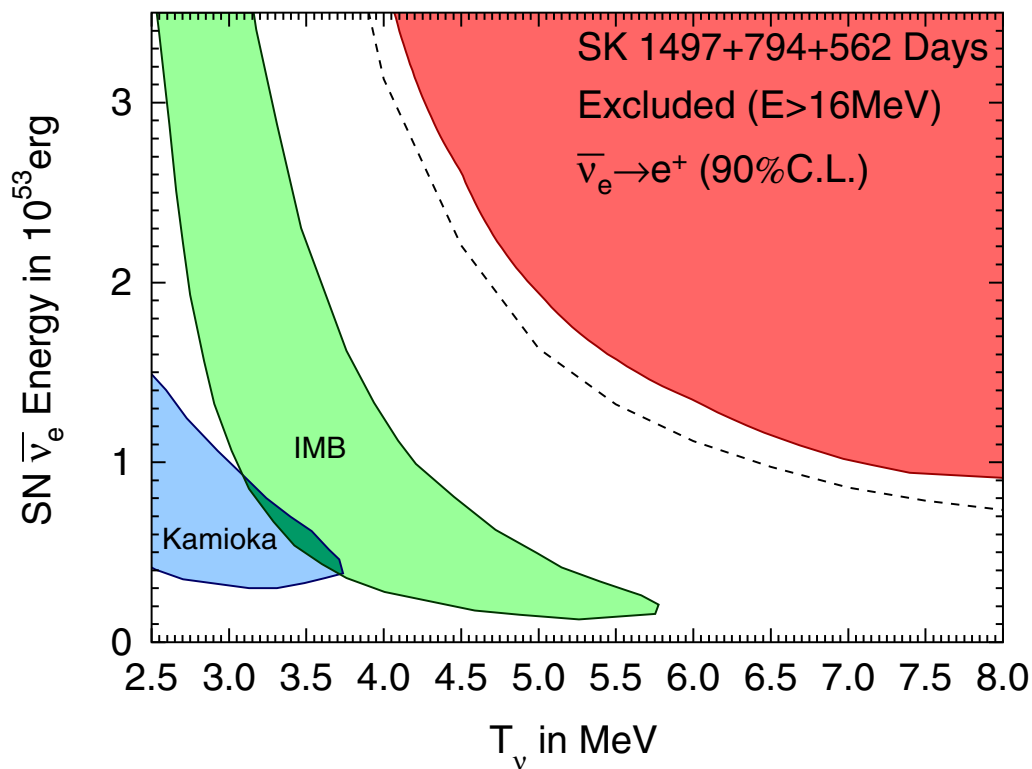
実験	発表年	検出器タイプ	有効体積	測定日数	エネルギー領域
Kamiokande	1988	水	680 ton	1040 days	20~50 MeV
LSD	1992	液体シンチレータ	90 ton	847.3 days	20~50 MeV
Super-K	2003	水	22500	1496	18~34
	2012		ton	2853	16~100
SNO	2006	重水	770 ton	306.4 days	21~35 MeV
(Borexino)	2011	液体シンチレータ	270 ton	736 days	1.8~17.8 MeV
KamLAND	2012	液体シンチレータ	700 ton	2343 days	8.3~31.8 MeV

# スーパーカミオカンデ



# スーパーカミオカンデ (2012)

## 超新星背景ニュートリノのフラックス上限値

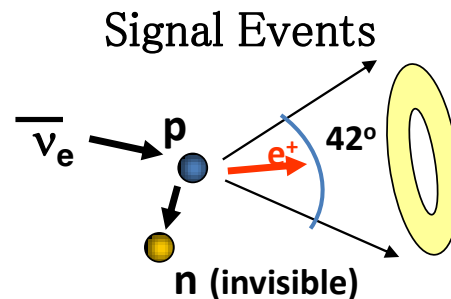
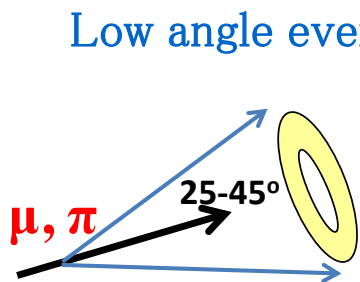
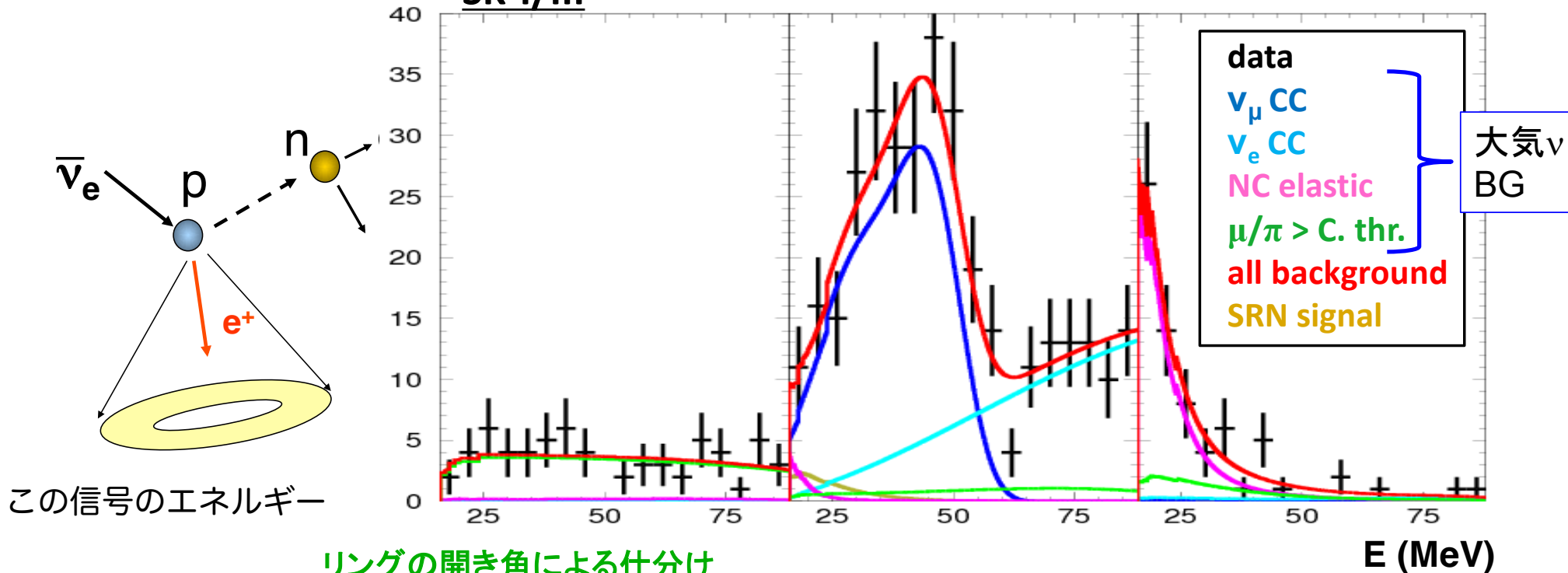




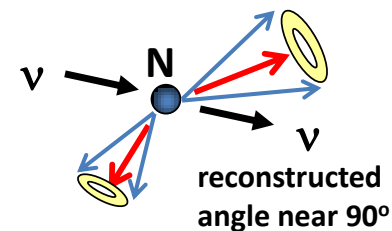
# スーパーカミオカンデ (2012)

SK collaboration, Phys. Rev. D 85, 052007 (2012)

SK-I/III

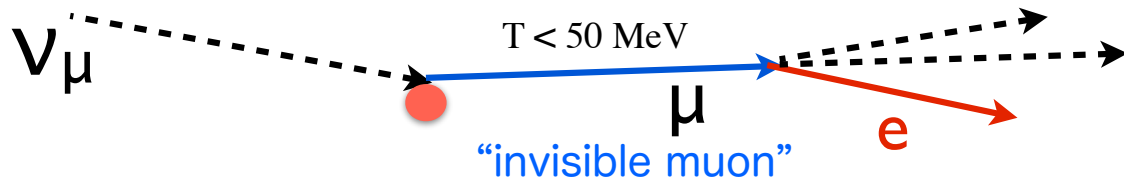


Isotropic Events

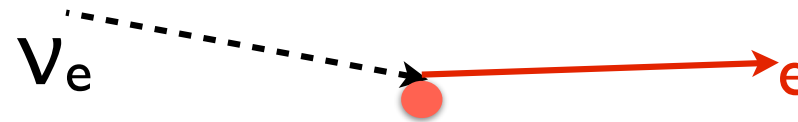


# バックグラウンド事象

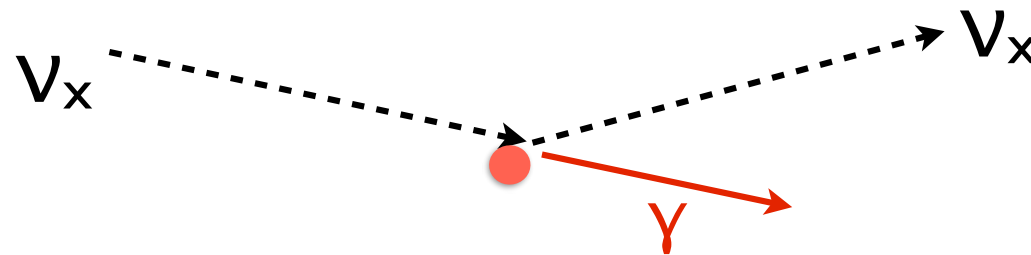
Decay electron  
“atm. muon neutrinos”



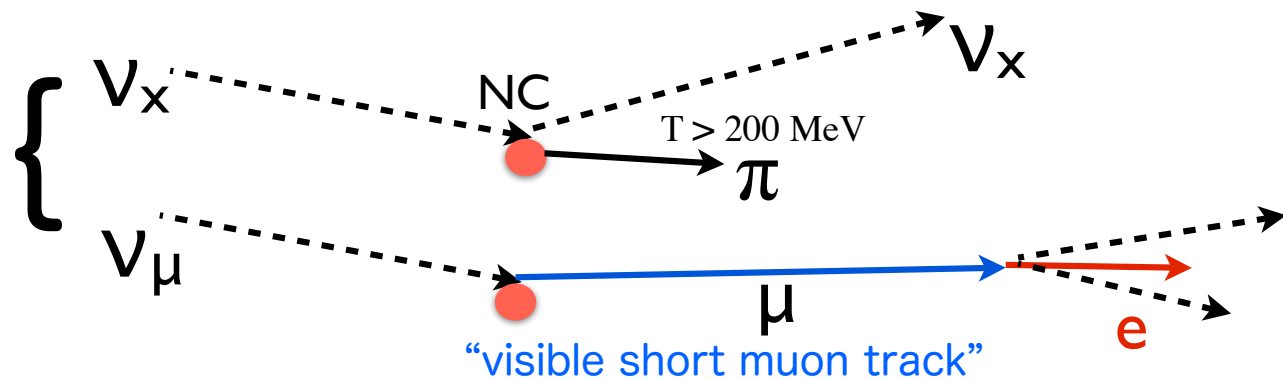
$\nu_e$  CC  
“atm. electron neutrinos”



NC Elastic  
“atmospheric”



$\mu/\pi$   
“ $\mu/\pi$  production  
from atm. neutrinos”

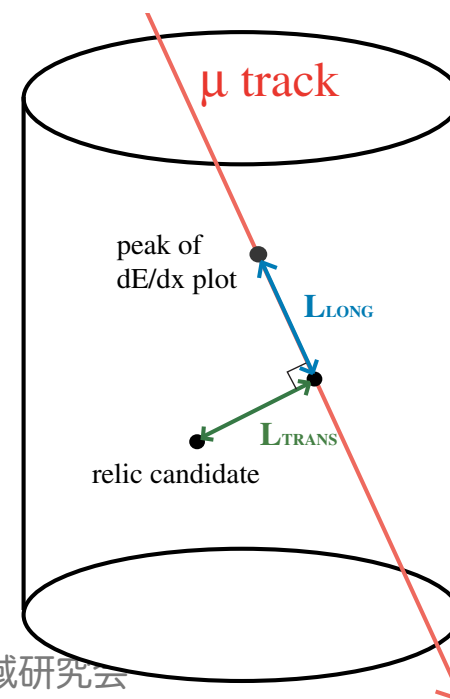
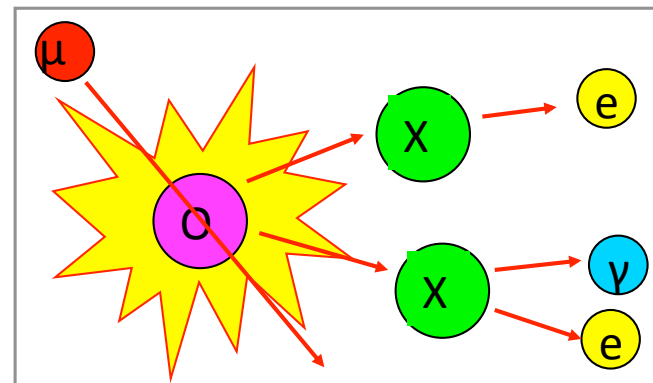


# バックグラウンド事象

( $E < 16\text{MeV}$ )

## ミューオンによる酸素原子核破碎

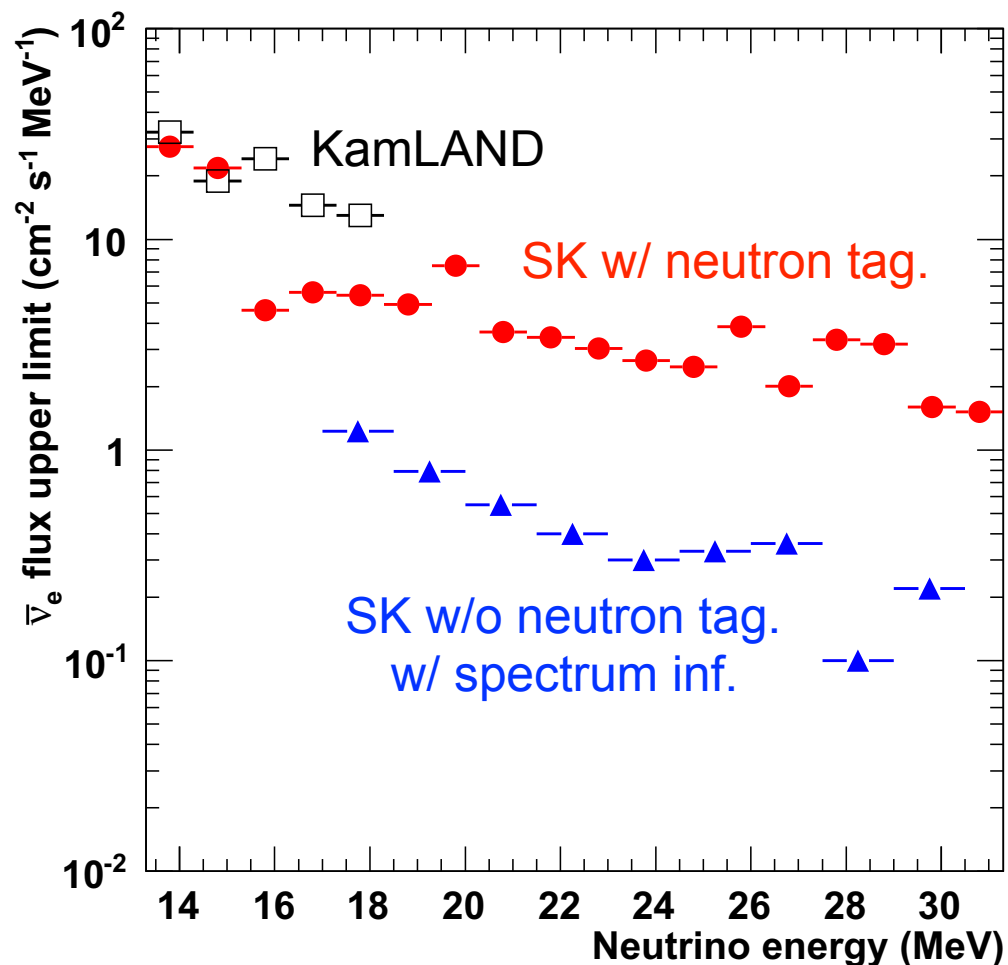
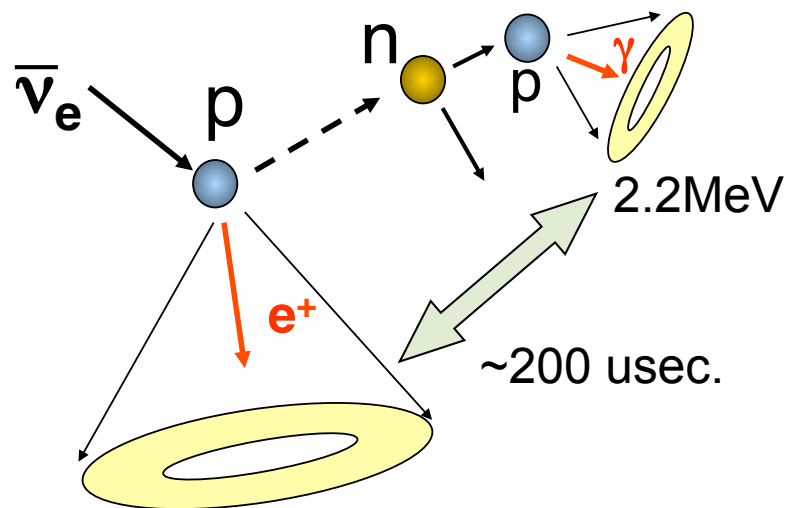
Isotope	$\tau_{1/2}(\text{sec})$	Decay mode	Kinetic Energy(MeV)
${}^{11}_3\text{Li}$	0.0085	$\beta^-$ $\beta^- + n$	20.77 (31%) ~16 (61%)
${}^{13}_8\text{O}$	0.0090	$\beta^+ + p$	8~14
${}^{12}_7\text{N}$	0.0110	$\beta^+$	16.38
${}^{12}_4\text{Be}$	0.0114	$\beta^-$	11.66
${}^{14}_5\text{B}$	0.0161	$\beta^-$	14.07+6.09( $\gamma$ )
${}^{13}_5\text{B}$	0.0173	$\beta^-$	13.42
${}^{12}_5\text{B}$	0.0204	$\beta^-$	13.37
${}^8_2\text{He}$	0.122	$\beta^-$ $\beta^- + n$	10.56+0.99( $\gamma$ ) (11%)
${}^9_6\text{C}$	0.127	$\beta^+ + p$	3~13
${}^9_3\text{Li}$	0.178	$\beta^-$ $\beta^- + n$	13.5 (75%) 11.0+2.5( $\gamma$ ) (25%) ~ 10 (35%)
${}^{16}_6\text{C}$	0.7478	$\beta^- + n$	~4
${}^8_5\text{B}$	0.77	$\beta^+$	13.73
${}^8_3\text{Li}$	0.84	$\beta^-$	12.5~13.0
${}^{15}_6\text{C}$	2.449	$\beta^-$	9.82 (32%) 4.51+5.30( $\gamma$ ) (68%)
${}^{16}_7\text{N}$	7.134	$\beta^-$	10.44(26%) 4.27+6.13( $\gamma$ ) (74%)
${}^{11}_4\text{Be}$	13.8	$\beta^-$	11.48 (61%) 9.32+2.1( $\gamma$ ) (29%)



# スーパーカミオカンデ (2015)

同時遅延計測を使った反電子ニュートリノフラックスの上限値

SK-4 からは電子回路の改良により  
検出効率が高くないが (~20%)  
同時遅延計測もできるようになった



超新星背景ニュートリノの発見には至っていないが  
理論予測値には近づいている

バックグラウンドを如何に落とすか

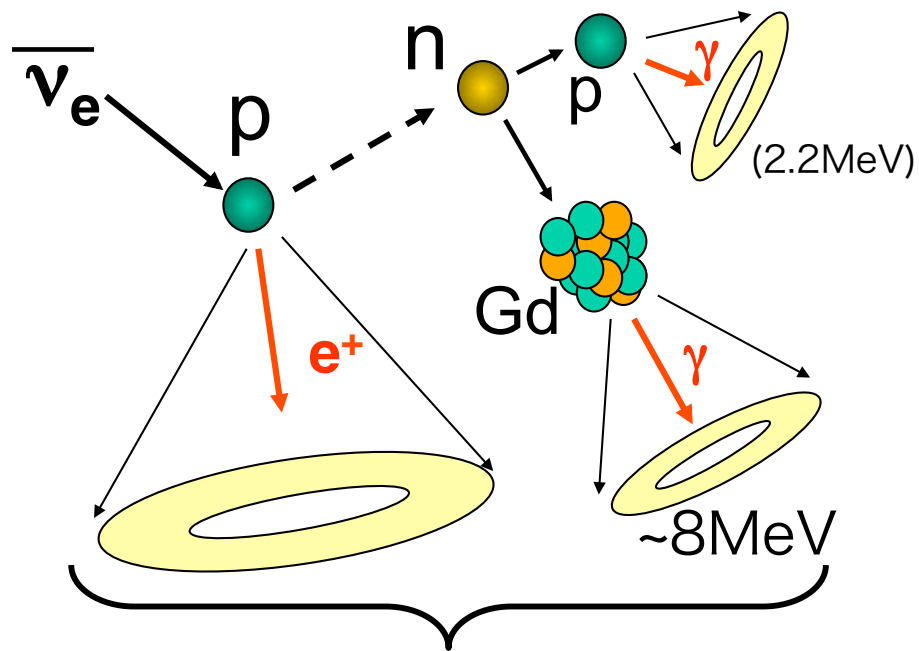


SK-Gd 実験

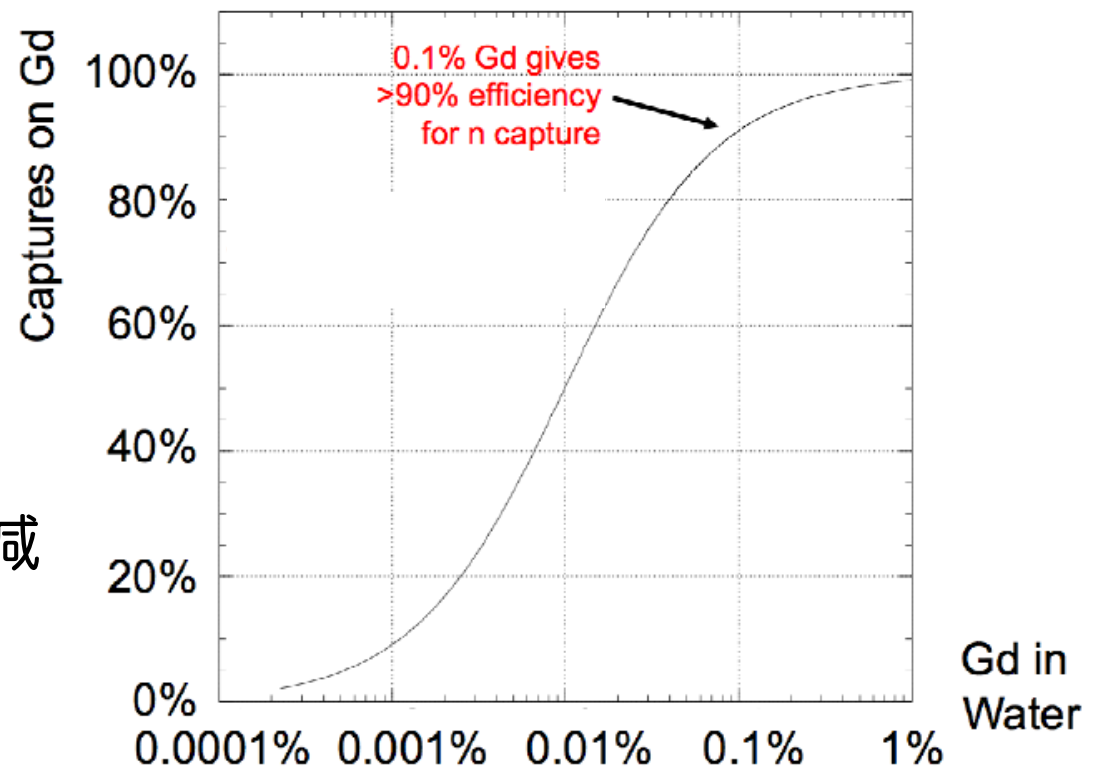


What's SK-Gd

# Super-K with Gadolinium



Dissolve Gadolinium into Super-K  
 J.Beacom and M.Vagins,  
 Phys.Rev.Lett.93 (2004) 171101



同時遅延計測

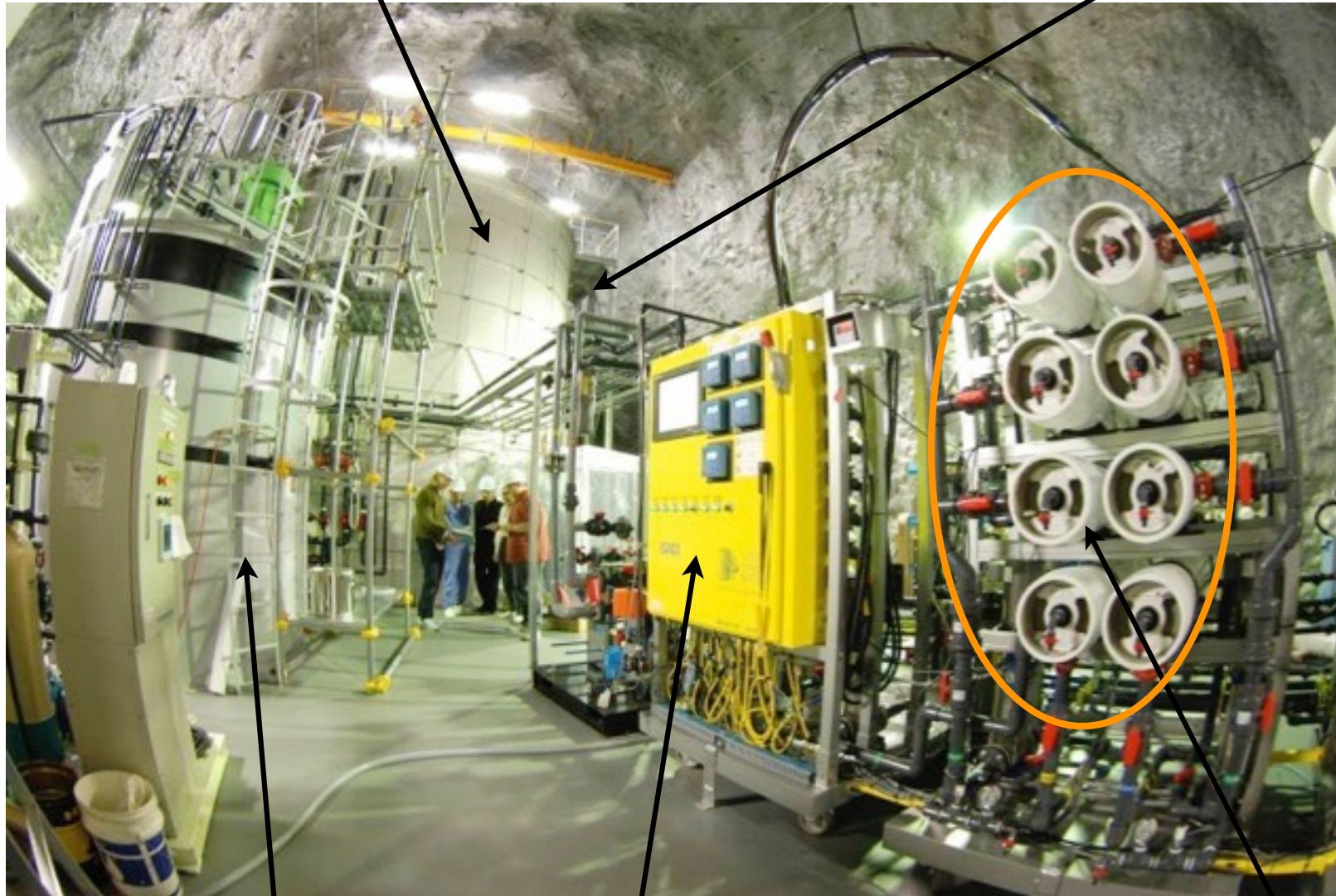
$\bar{\nu}_e$  信号に対するBGを劇的に削減

$\Delta T \sim 20 \mu\text{sec}$

Vertices within  $\sim 50\text{cm}$

# EGADS

200 ton tank



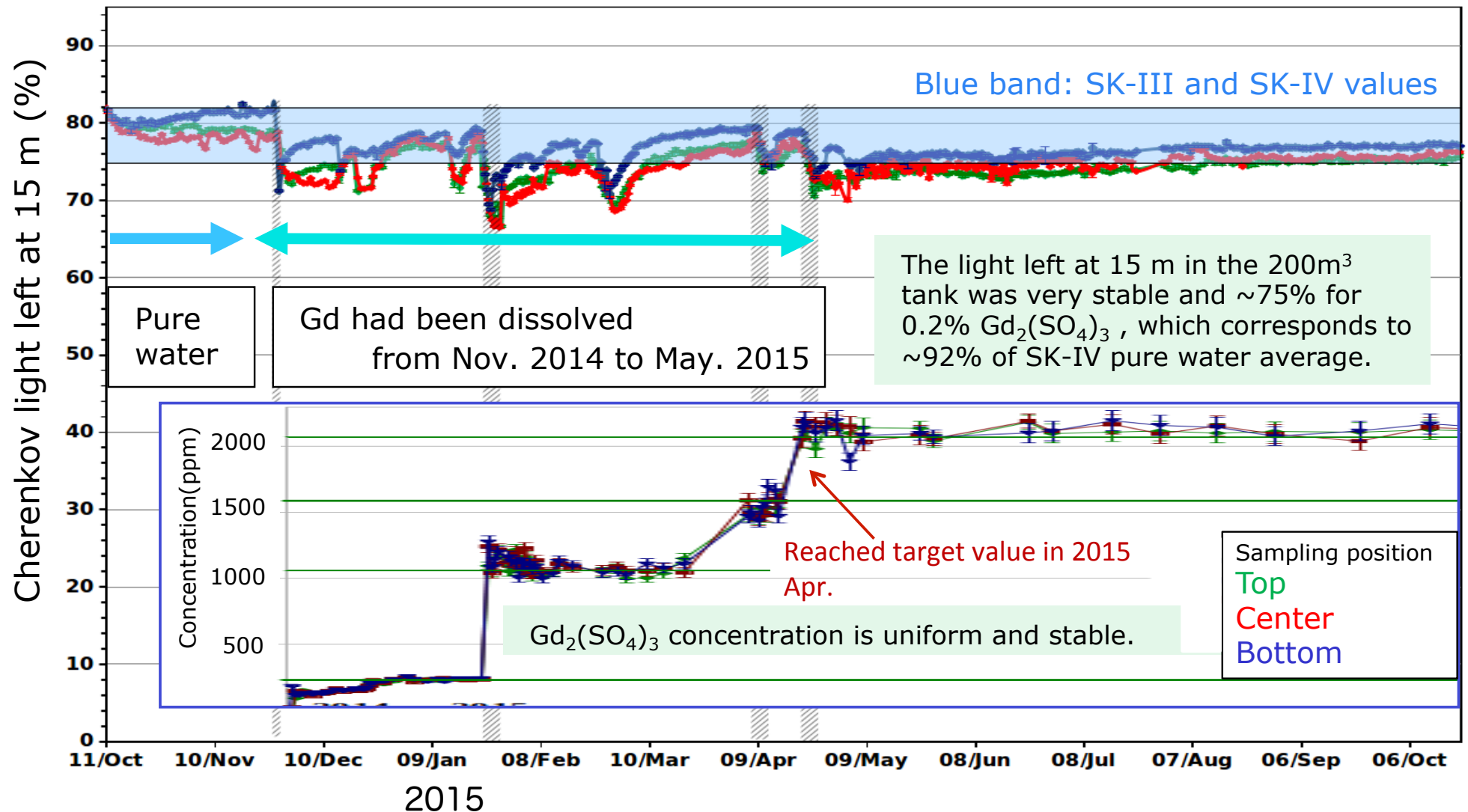
15 ton buffer tank

Control panel of circulation system

Filter

# EGADS

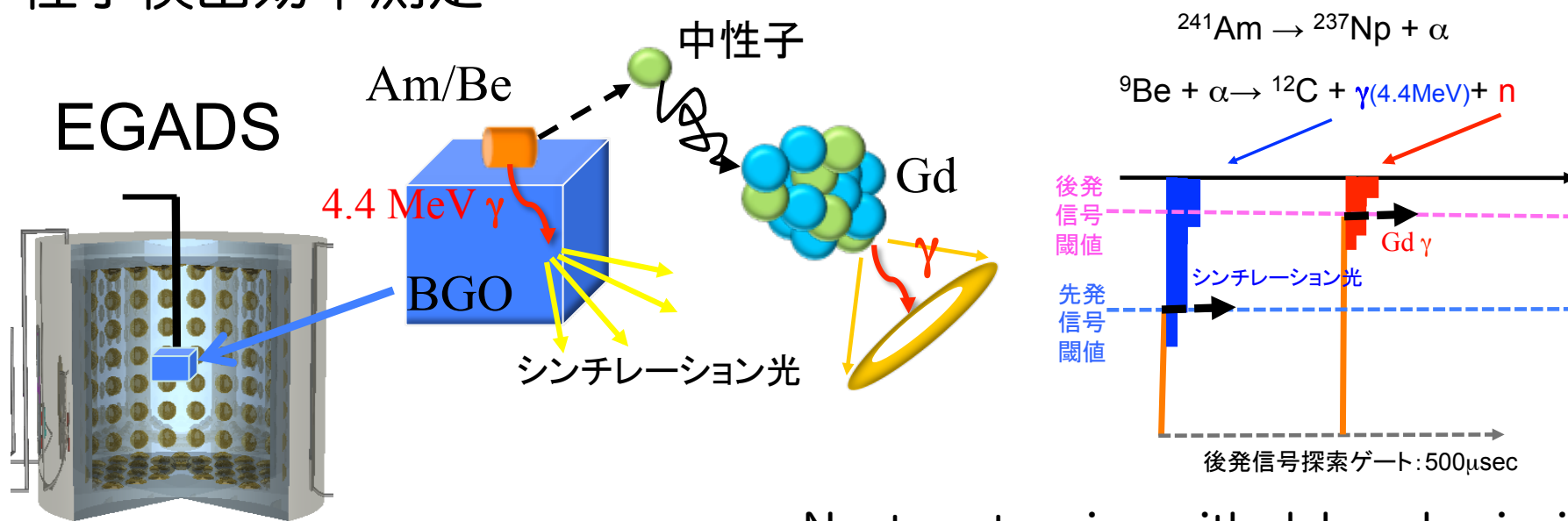
## 水の透過率とGd濃度





# EGADS

## 中性子検出効率測定



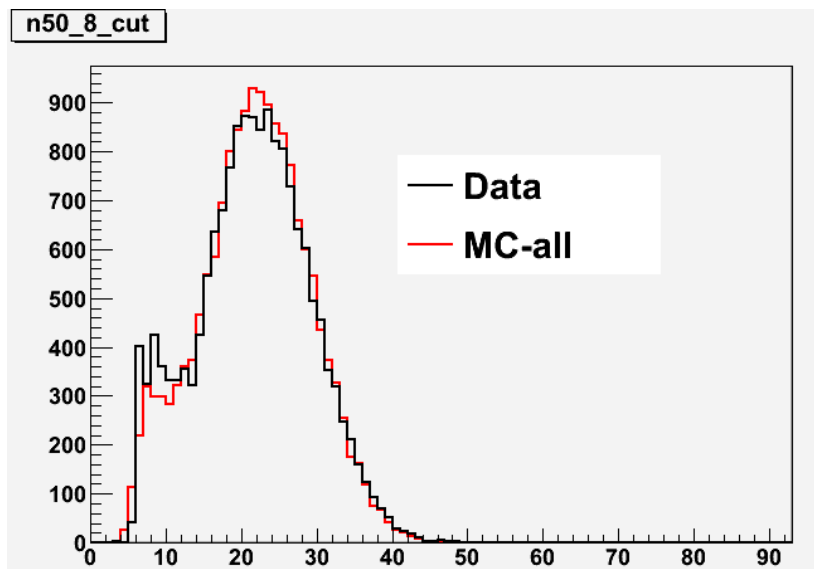
## Neutron tagging with delayed coincidence

### Neutron capture time

	2178 $\pm$ 44ppm	1055 $\pm$ 21ppm	225 $\pm$ 5ppm
Data	29.89 $\pm$ 0.33	51.48 $\pm$ 0.52	130.1 $\pm$ 1.7
MC	30.03 $\pm$ 0.77	53.45 $\pm$ 1.19	126.2 $\pm$ 2.0

### Neutron capture efficiency

Data	MC
84.36 $\pm$ 1.79%	84.51 $\pm$ 0.33%





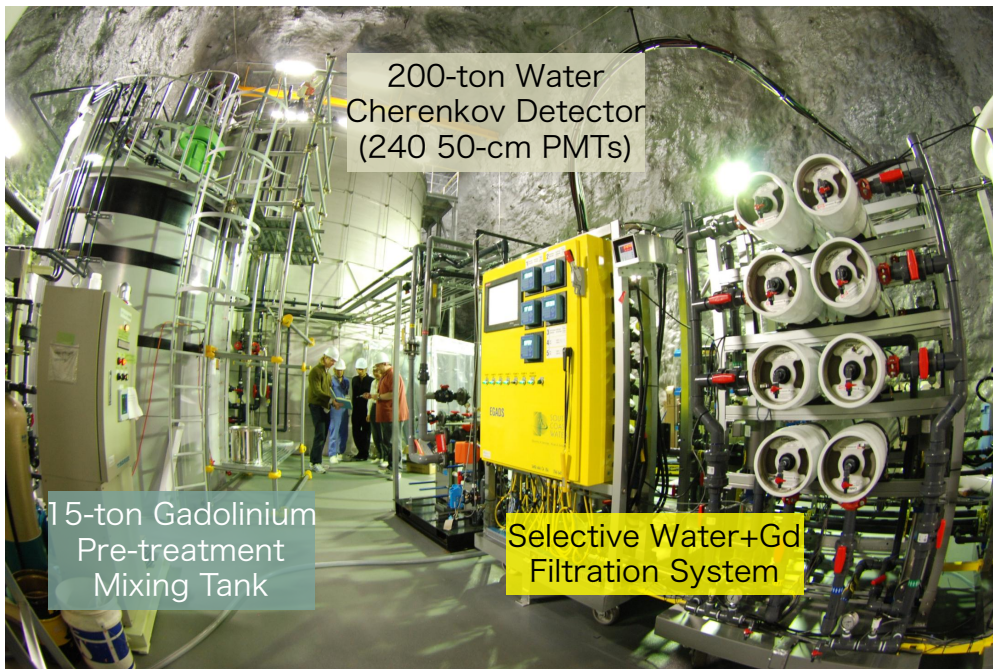
# Innovative area (H24-28)

## 'Gravitational Wave Source'

### A03 : Neutrinos

Existing R&D Facility  
EGADS (200 tons) →

Converting into the world's  
most advanced SN  $\nu$  detector



e.g.

3690 events at 3000 light-years

369000 events at 300 light-years

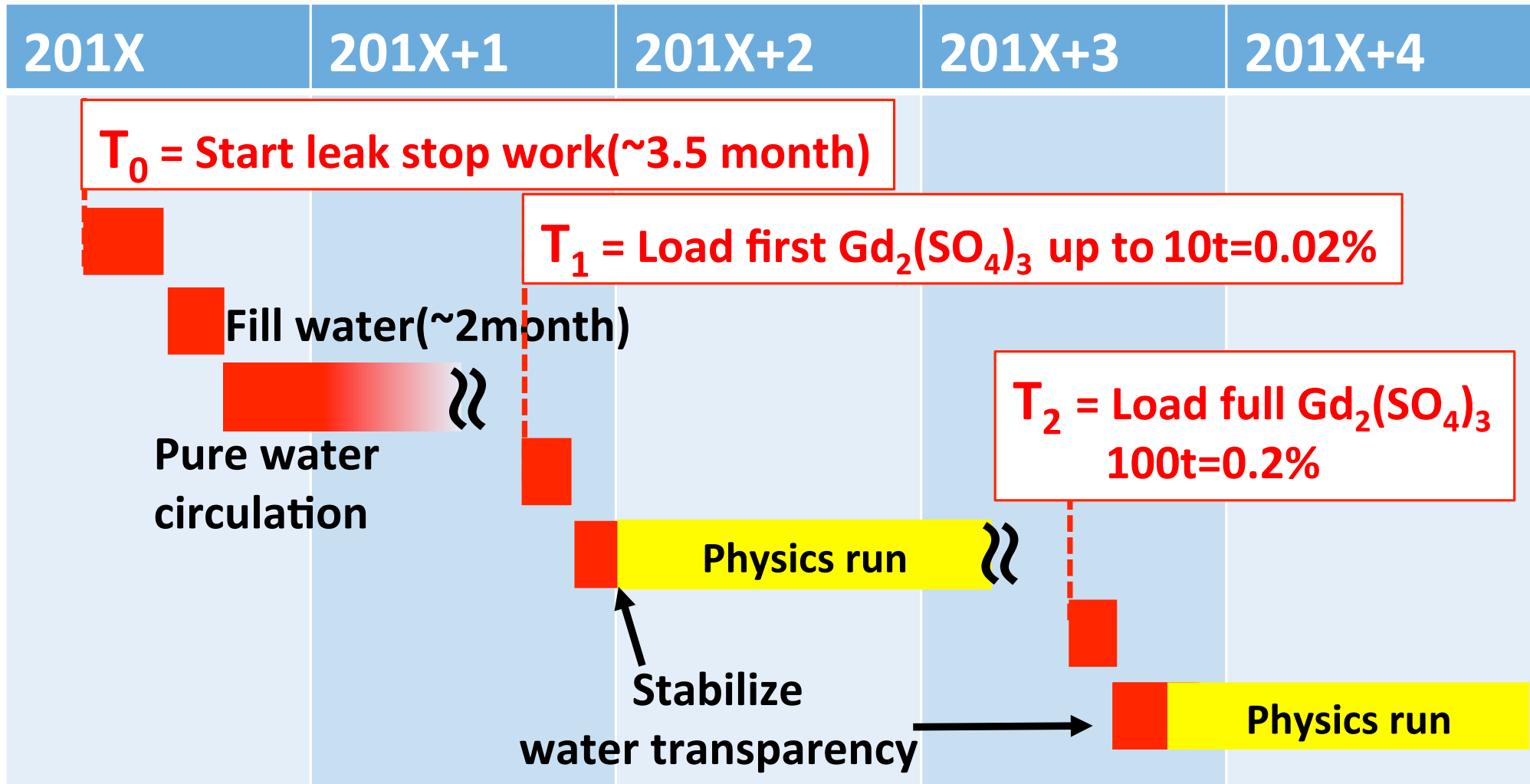
### Special feature of SN $\nu$ and GW

- Provide image of core-collapse itself
- Only SN messenger which travel without attenuation to Earth (dust does not affect signal)

(SK tank open 時の代替機としても)

2015年に SK-Gd プロジェクトが  
コラボレーションに認められた。

# SK-Gd



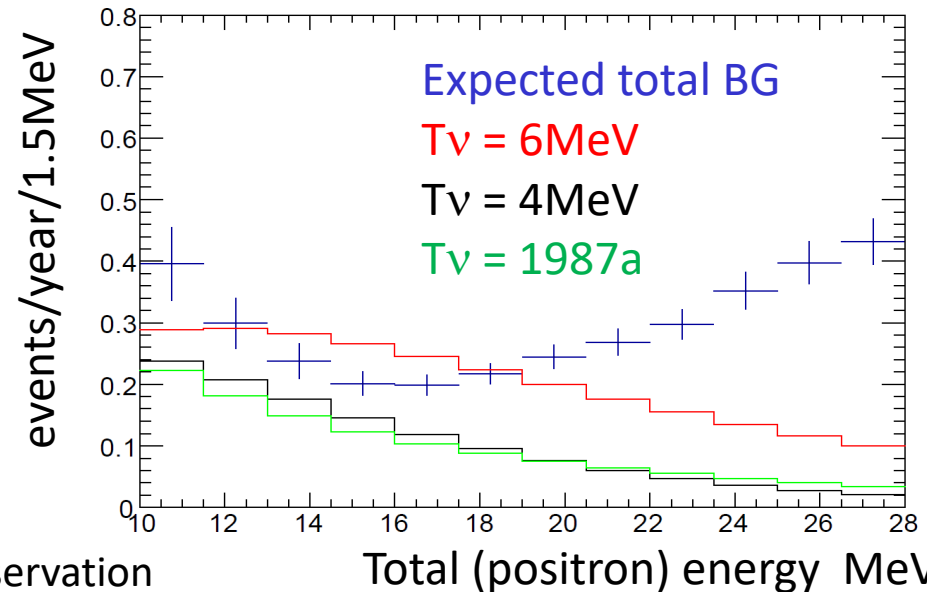
# SK-Gd

## 期待される感度

DSNB flux:

Horiuchi, Beacom and Dwek,  
PRD, 79, 083013 (2009)

- It depends on typical/actual SN emission spectrum



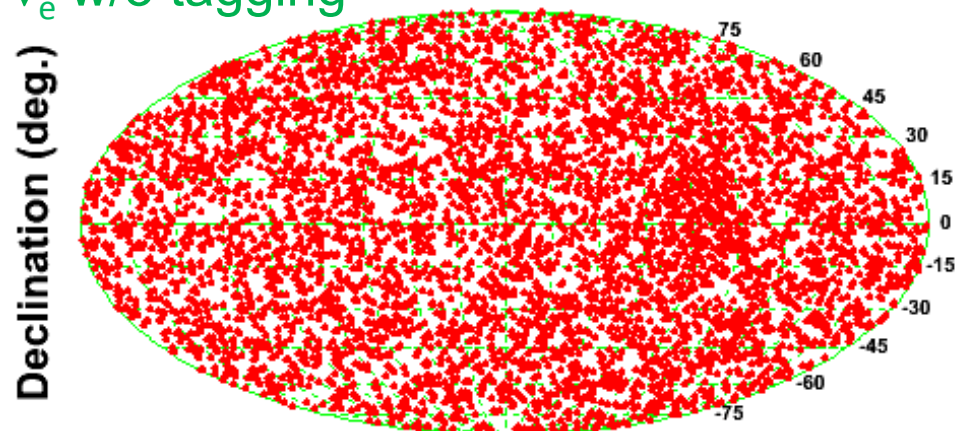
DSNB events number with 10 years observation

HBD models	10-16MeV (evts/10yrs)	16-28MeV (evts/10yrs)	Total (10-28MeV)	significance (2 energy bin)
$T_{\text{eff}} 8\text{MeV}$	11.3	19.9	31.2	$5.3 \sigma$
$T_{\text{eff}} 6\text{MeV}$	11.3	13.5	24.8	$4.3 \sigma$
$T_{\text{eff}} 4\text{MeV}$	7.7	4.8	12.5	$2.5 \sigma$
$T_{\text{eff}} \text{SN1987a}$	5.1	6.8	11.9	$2.1 \sigma$
BG	10	24	34	----

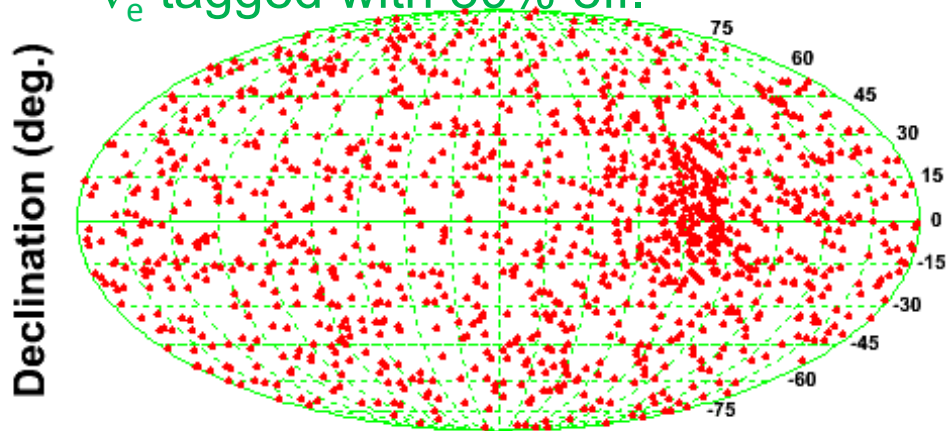
最初の発見が期待できる

# 超新星爆発ニュートリノ

$\bar{\nu}_e$  w/o tagging

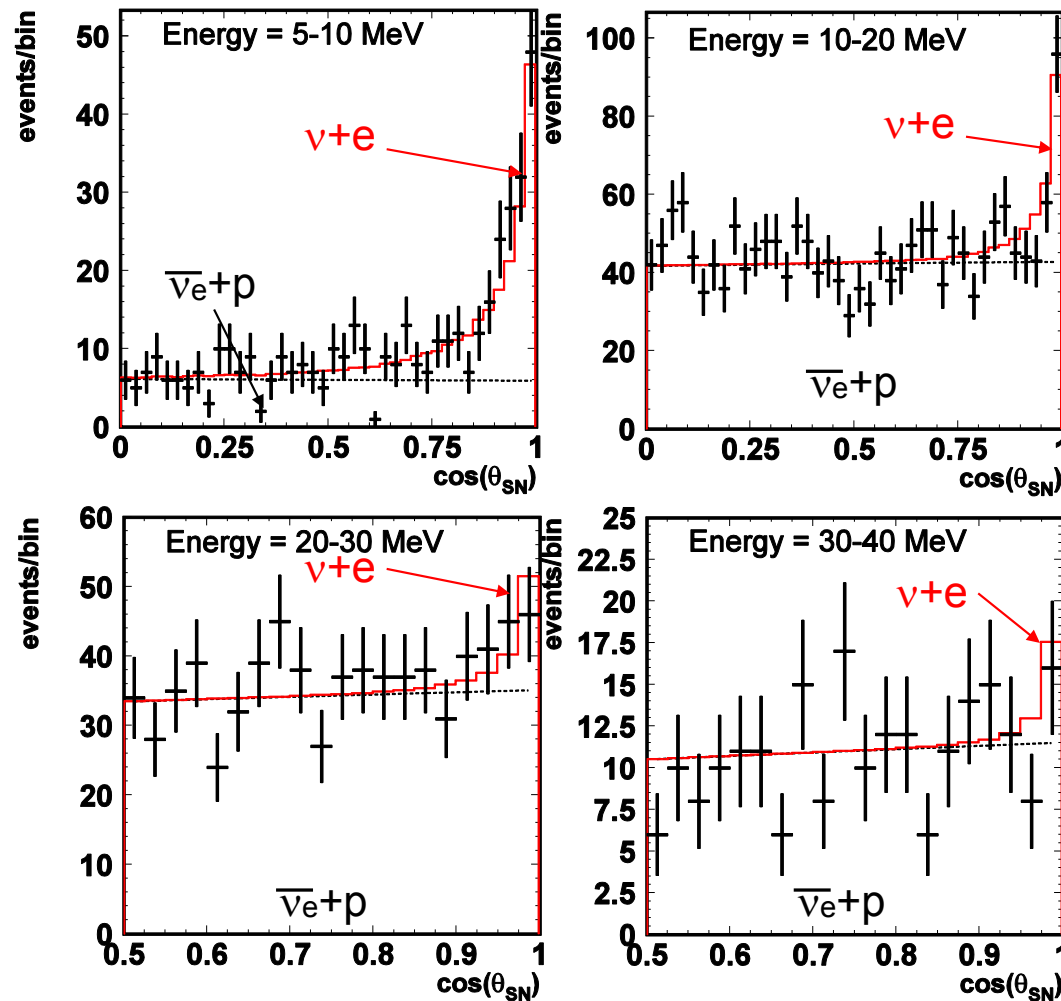


$\bar{\nu}_e$  tagged with 80% eff.



Right ascension (deg.)

中性子タグなし

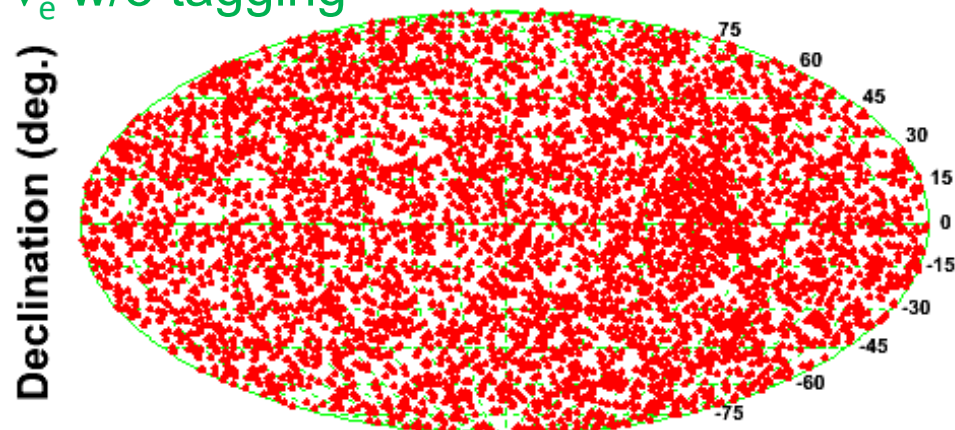


6度程度の精度で方向決定可

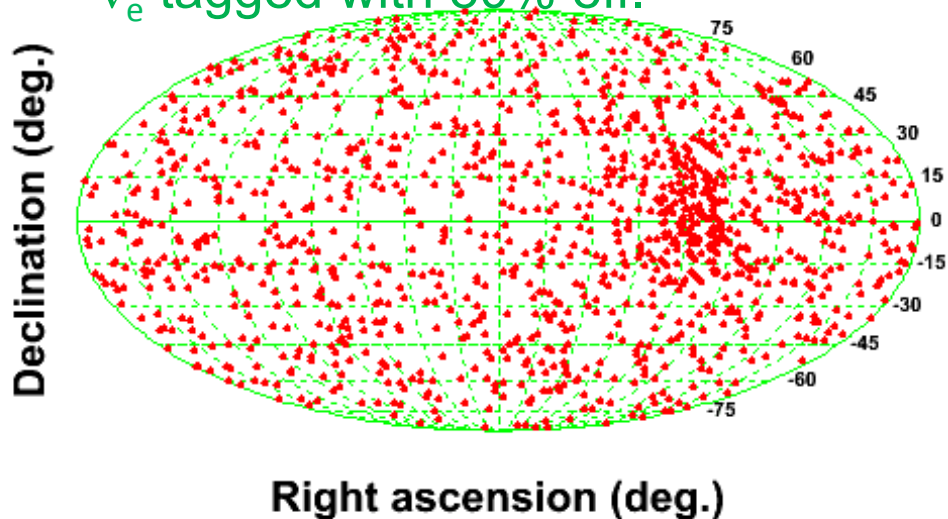


# 超新星爆発ニュートリノ

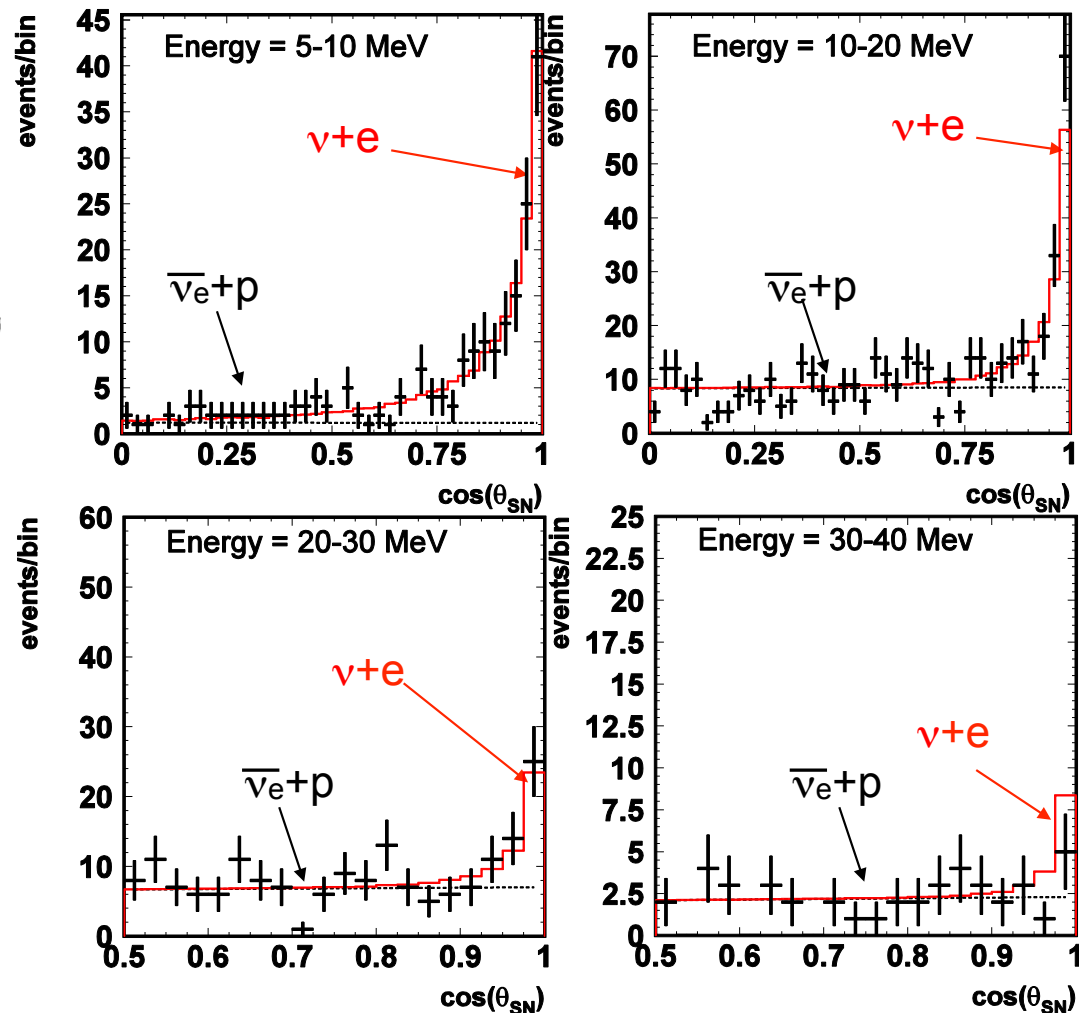
$\bar{\nu}_e$  w/o tagging



$\bar{\nu}_e$  tagged with 80% eff.



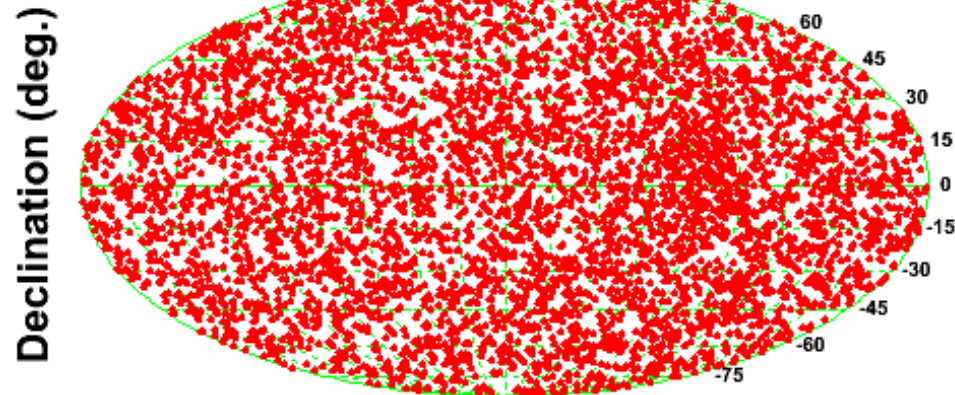
中性子タグあり



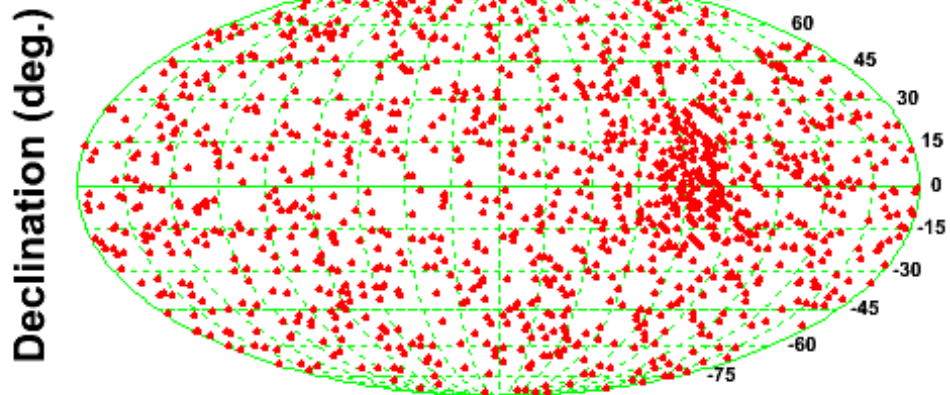
3度程度の精度で方向決定可

# 超新星爆発ニュートリノ

$\bar{\nu}_e$  w/o tagging

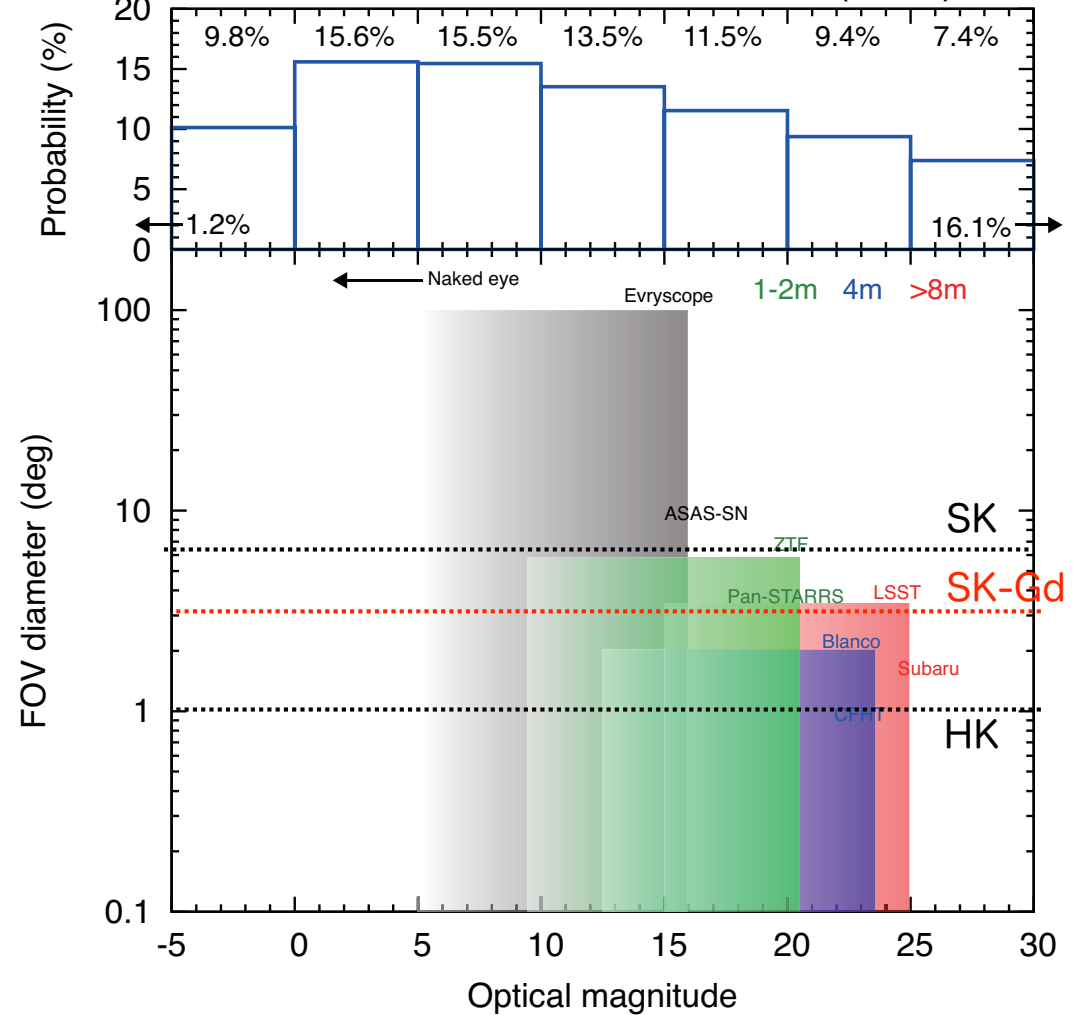


$\bar{\nu}_e$  tagged with 80% eff.



Right ascension (deg.)

K.Nakamura et. al. MNRAS 461, 3296 (2016)



# SK-Gd 計画

- 超新星背景ニュートリノの発見を目指す
- R&Dは終了。SKの公式計画として認められた。  
開始に向けた最終段階
- 超新星爆発ニュートリノ（前兆ニュートリノも含む）の感度向上も期待
- 中性子の遅延同時計測の検出効率向上は、他の物理解析にも役立つ

乞うご期待